

На правах рукописи



ХАММАТОВ Ильшат Маулитович

**ИССЛЕДОВАНИЕ НАЧАЛЬНОГО ПЕРИОДА
АГЛОМЕРАЦИОННОГО ПРОЦЕССА И РАЗРАБОТКА
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ КОНСТРУКЦИИ ГОРНА**

05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2014

Работа выполнена в ОАО «Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники» (ОАО «ВНИИМТ») и на кафедре теплофизики и информатики в металлургии ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Дружинин Геннадий Михайлович

Официальные оппоненты: **Фролов Юрий Андреевич**,
доктор технических наук, ООО научно-производственное предприятие «Уралэлектра», консультант – металлург отдела систем регулирования и метрологии

Чесноков Юрий Анатольевич,
кандидат технических наук, ФГБУН Институт металлургии УрО РАН, исполняющий обязанности заведующего лабораторией пирометаллургии черных металлов

Ведущая организация: ОАО «Научно-исследовательский и проектный институт обогащения и механической обработки полезных ископаемых «Уралмеханобр»

Защита состоится 26 декабря 2014 г. в 15:00 ч на заседании диссертационного совета Д 212.285.05 на базе ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (Зал учёного совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <http://dissovet.science.urfu.ru/news2/>

Автореферат разослан «10» ноября 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Сулицин Андрей Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Режим нагрева шихты и зажигания твердого топлива зависит от характеристик конкретных шихтовых материалов и вида топлива, сжигаемого в горне над слоем. В дальнейшем режим нагрева оказывает существенное влияние на ход процесса спекания и во многом определяет качество агломерата, производительность агломашины и выбросы в атмосферу вредных веществ. Конструкция горна должна обеспечивать необходимую температуру и продолжительность зажигания с минимальными затратами тепла. Указанное предполагает необходимость разработки методики расчета продолжительности зажигания твердого топлива агломерационной шихты, которую также возможно было бы использовать в алгоритме системы автоматического управления тепловым режимом горна.

Цель работы: исследование теплотехнических особенностей процесса агломерации железорудных материалов и создание энергоэффективной конструкции зажигательного горна.

Для достижения указанной цели поставлены и решены следующие научно-технические **задачи**:

- разработана методика расчета продолжительности зажигания агломерационной шихты с учетом ее свойств и вида газообразного топлива;
- разработана энергоэффективная конструкция зажигательного горна, отапливаемого различными видами газообразного топлива;
- разработан алгоритм и система автоматического управления работой горна с учетом полного цикла работы агломашины;
- проведены исследования тепловой работы горнов разработанной конструкции на агломерационных машинах различной производительности.

Методы исследований

Использовались методы математического моделирования, фундаментальные закономерности и основные положения процессов тепломассообмена в агломерационном производстве, а также проводились экспериментальные исследования на промышленных агрегатах.

Научная новизна:

1. Установлена зависимость количества выгоревшего углерода топлива шихты от концентрации кислорода в продуктах сгорания газообразного топлива в горне.
2. Получено выражение для расчета скорости фильтрации продуктов сгорания через слой под горном и степени дросселирования вакуум-камер при нагреве шихты и в режиме зажигания.
3. Разработана методика расчета времени зажигания агломерационной шихты в зависимости от конкретных начальных условий, включающих характеристики шихтовых материалов, вид газообразного топлива и планируемые затраты тепла на зажигание.
4. Разработан алгоритм системы автоматического управления тепловым и газодинамическим режимами работы зажигательного горна, базовым парамет-

ром которого является удельный расход тепла на зажигание, включающий и физическое тепло воздуха горения.

Практическая значимость

Полученная зависимость количества выгоревшего в слое углерода топлива от содержания свободного кислорода в газе на выходе из слоя позволяет определить необходимый режим сжигания (α – коэффициент расхода воздуха) и, при необходимости, регулировать концентрацию кислорода добавкой атмосферного воздуха в слой.

Методика расчета продолжительности зажигания используется при конструировании горна, а именно: для определения его длины, как в случае модернизации существующих агломерационных машин, так и при создании новых.

Разработанная с учетом сформулированных требований и полученных расчетных зависимостей конструкция горна обеспечивает равномерное по ширине и регулируемое по ходу движения слоя зажигание и нагрев шихты. Это, в свою очередь, позволяет получать высококачественный агломерат при снижении удельного расхода газообразного топлива в 2,0...2,5 раза по сравнению с работающими в настоящее время удлиненными горнами, реализующими комбинированный нагрев шихты.

Реализация результатов работы

Материалы работы были использованы при реконструкции и новом строительстве агломашин Челябинского металлургического комбината, Высокогорского ГОКа и Визакхапатнамского металлургического завода (Индия).

Личный вклад автора

Участие в постановке задач работы и разработке методик исследований.

Определение зависимости количества углерода твердого топлива, переходящего в газ из слоя под горном, от содержания кислорода в продуктах сгорания.

Участие в разработке методики расчета режима зажигания, конструкции горна и горелок для агломерационных машин МАК-75, МАК-138/240, МАК-408.

Разработка алгоритма и принципиальных схем управления тепловым и газодинамическим режимами работы горна - ВГОК и аглофабрика №2 ОАО «Мечел».

Участие в разработке схемы рециркуляции аглогаса на агломашине МАК-138/240 ОАО «Мечел». Участие в разработке схемы работы горна на коксодоменной смеси с нагретым воздухом, подаваемым в горелки горна и в слой за горном на агломашине МАК-408 ВМЗ (Индия).

Автор защищает:

- зависимость для определения количества выгоревшего в слое углерода шихты от вида газообразного топлива и содержания кислорода в газе под горном;
- методику расчета продолжительности зажигания твердого топлива шихты при производстве офлюсованного агломерата;
- конструкцию горна и горелочных устройств при использовании различных видов газообразного топлива для зажигания твердого топлива шихты;

- алгоритм автоматического управления тепловой работой горна с целью стабилизации температурного и газодинамического режимов начального периода агломерации.
- результаты промышленных исследований тепловой работы горнов новой конструкции на агломерационных машинах различной площади спекания.

Апробация работы

Материалы исследований доложены на конференциях: VI всероссийская научно-практическая конференция СибГИУ. Новокузнецк, 17-19 мая 2007 г.; научно-техническая конференция, посвященная 80-летию ВНИИМТ (Екатеринбург, 2010 г.).

Публикации

Основные положения диссертации отражены в восьми печатных работах, в том числе в трех изданиях, рекомендованных ВАК, в двух патентах, пяти статьях в сборниках трудов конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа изложена на 208 страницах машинописного текста, включая 36 рисунков, 26 таблиц, и состоит из общей характеристики работы, 4 глав, заключения, библиографического списка из 88 источников отечественных и зарубежных авторов и 4 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы, обозначены цель и задачи исследований, показана научная новизна и практическая ценность полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** проведен анализ литературных данных который показал, что возможности существующих методов расчета, необходимых для количественного определения показателей процесса зажигания при реконструкции действующих и вновь проектируемых зажигательных горнов, ограничены. В связи с этим, имеет место многообразие конструкций горнов и систем их отопления.

Для определения требований предъявляемых к режимам работы и конструкции горна исходят из газодинамических свойств агломерационной шихты. Основы теории расчета газодинамических характеристик слоя шихты сформулированы в исследованиях А.А. Сигова, В.И. Коротича, В.П. Пузанова и в дальнейшем развиты в трудах ВНИИМТ, кафедры металлургических печей УГТУ-УПИ и Ю.А. Фроловым.

Под горном в слое агломерационной шихты происходят три последовательных и непрерывных во времени процесса (Рисунок 1). Вначале происходит нагрев шихты до температуры воспламенения твердого топлива (период I), его сменяет период II горение твердого топлива, во время которого формируется активная зона горения в слое шихты и в заключительный период III происходит дополнительный нагрев слоя, необходимый для выравнивания температур спекания по высоте слоя шихты. Продолжительностью первого периода можно считать время от момента входа шихты под горн до момента ее нагрева до температуры воспламенения твердого топлива (700 °C); второго – время выгорания ча-

стичек твердого топлива в верхней части слоя; третьего – время формирования из расплава готового агломерата. После нахождения слоя под горном следует основной период спекания. В соответствии с последовательностью данных периодов горн условно разделяют по длине на три соответствующие части: предварительного нагрева, зажигания топлива шихты и дополнительного нагрева верхнего слоя спека.

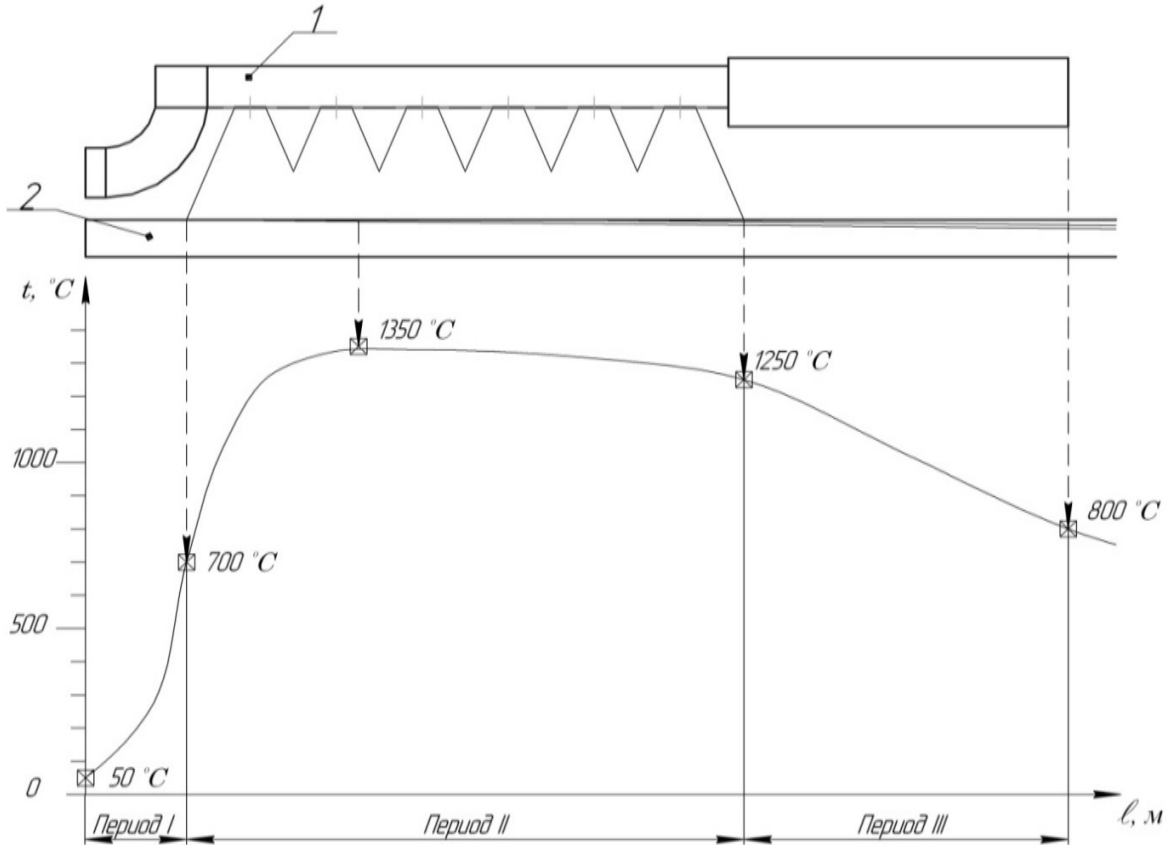


Рисунок 1 – Тепловая схема горна. 1 – зажигательный горн; 2 – слой агломерационной шихты; период I – нагрев шихты до температуры воспламенения твердого топлива; период II – горение твердого топлива; период III – дополнительный нагрев слоя

Слой агломерационной шихты в указанные периоды имеет различные газодинамические характеристики, что обусловлено развитием зон (конденсации, переувлажнения и сушки) при нагреве слоя и фильтрации через него горновых газов.

Основным фактором снижения производительности агломашины в период нагрева шихты от внешнего источника является увеличение гидравлического сопротивления слоя вследствие усадки. Существует три вида усадки при спекании агломерационной шихты. Холодная усадка, которая возникает из-за более плотной упаковки гранул исходной шихты, вследствие разрушения и перемещения этих гранул потоком газов, имеющих температуру, равную начальной температуре шихты, а также давлением массы вышележащего столба материалов. Усадка при зажигании, вызванная разрушением и более плотной упаковкой гранул переувлажненной шихты в результате фильтрации через слой газа, имеющего «равновесную температуру испарения» и вызывающего конденсацию влаги в слое. А также усадка при спекании из-за размягчения и оплавления компонентов шихты в зоне высоких температур. Холодная усадка для типичных неподогретых

шихт составляет 28...40, при зажигании – 50...60 и при спекании – 8...10% от общей усадки слоя.

Главными способами борьбы с усадкой являются предварительный подогрев шихты и уменьшение напорного давления газов фильтруемых через слой. Плавный нагрев шихты до температуры воспламенения топлива шихты под горном обеспечивает предварительный подогрев исходного материала, снижающий переувлажнение шихты. Уменьшение напорного давления газов фильтруемых через слой достигается дросселированием вакуум-камер, перекрываемых горном. Другим способом увеличения удельной производительности агломашины и снижения расхода топлива на горн является увеличение концентрации кислорода за счет подачи в горелки нагретого воздуха, например, от охладителя агломерата.

С целью получения в верхнем слое агломерата, идентичного по качеству агломерату нижележащих слоев, применяют технологию комбинированного нагрева шихты. Суть которой состоит в создании в поверхностном слое тех же температурных условий, что и в нижележащих слоях. Для этого в слой материала после зажигания твердого топлива вносят дополнительное тепло от внешнего источника. Исследования показали, что существующие конструкции горнов при современных требованиях к удельному расходу тепла на зажигание агломерационной шихты, количеству вредных выбросов и качеству получаемой продукции не позволяют осуществить комбинированный нагрев шихты.

Автоматическое управление горном позволяет стабилизировать температурные и газодинамические режимы, что увеличивает производительность агломашины за счет улучшения качества агломерата верхнего слоя, а также уменьшает удельный расход газообразного топлива на зажигание.

В этой связи, целью данной работы является исследование теплотехнических особенностей процесса агломерации железорудных материалов и создание энергоэффективной конструкции горна.

Для достижения сформулированной цели необходимо решить следующие научно-технические задачи:

1. Разработать методику расчета продолжительности зажигания агломерационной шихты с учетом свойств шихты и вида применяемого газообразного топлива.
2. Разработать энергоэффективную конструкцию зажигательного горна, отапливаемого различными видами газообразного топлива.
3. Разработать алгоритм и систему автоматического управления работой горна с учетом полного цикла работы агломашины.
4. Провести исследование тепловой работы горнов разработанной конструкции на агломерационных машинах различной производительности.

Во **второй главе** изложены общие подходы к определению конструктивных параметров горна, как при модернизации существующих агрегатов, так и при строительстве новых. В обоих случаях, как правило, известными (заданными) величинами являются характеристики шихты, высота слоя, ширина тележек, вид газообразного топлива для зажигания и удельный расход тепла на зажигание и подогрев спека. Для разработки конструкции горна необходимо определить длительность пребывания спека под горном, т.е. длину горна.

Тепловой баланс процесса выражается как равенство необходимого количества тепла на зажигание шихты количеству тепла, приносимые в шихту с продуктами сгорания:

$$qH\rho_{ш}k_{ш} = 60c_{np}t_{np}w\ell_{горн}. \quad (1)$$

Учитывая, что отношение длины горна ($\ell_{горн}$) к скорости аглоленты ($u_{л}$) есть время пребывания шихты под горном (τ) имеем:

$$\tau = \frac{qH\rho_{ш}k_{ш}}{6 \cdot 10^4 c_{np}t_{np}w}. \quad (2)$$

Время пребывания шихты под горном включает время нагрева исходной шихты до температуры воспламенения твердого топлива, время образования зоны горения и время дополнительного нагрева (Рисунок 2).

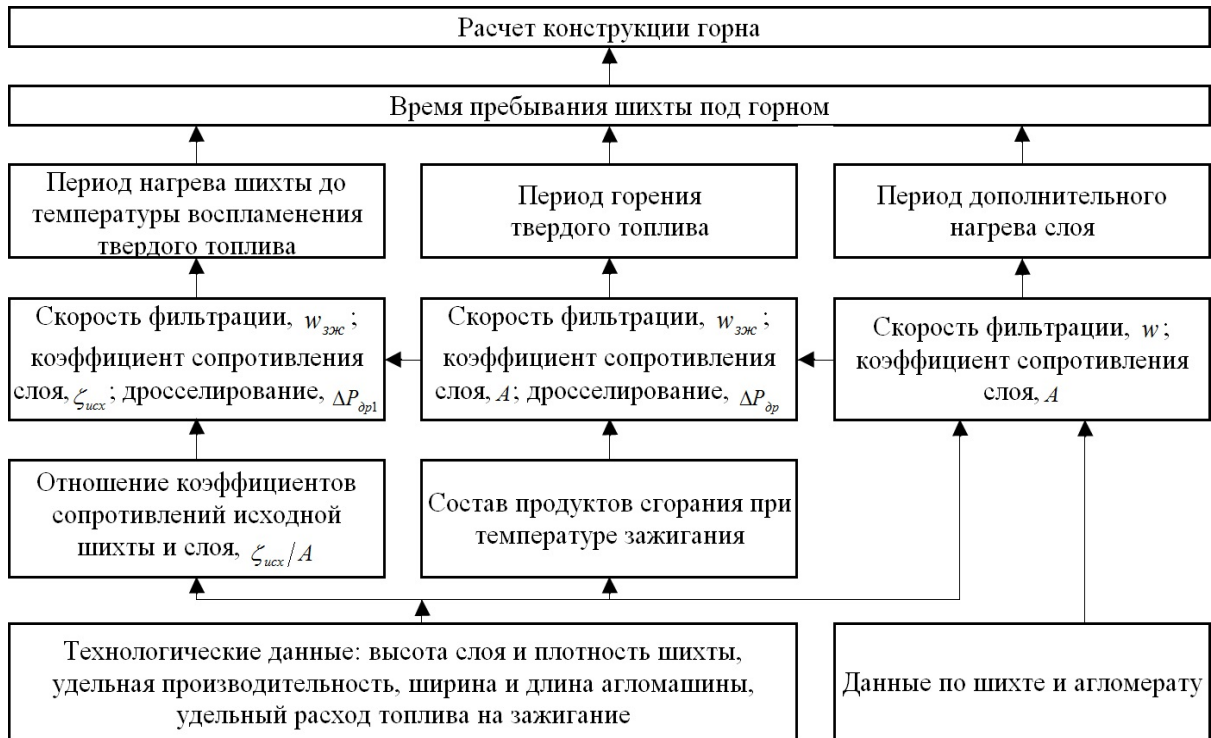


Рисунок 2 – Схема расчета времени пребывания шихты под горном

Период дополнительного нагрева слоя характеризуется одинаковой скоростью фильтрации (w) с основным периодом спекания. Для определения скорости фильтрации воздуха через слой используется величина удельного расхода воздуха на процесс спекания (V_g), в общем случае рассчитываемая как сумма расходов на горение углерода топлива шихты ($V_C^{зop}$), окисление двухвалентного железа (V_{FeO}), окисление сульфидной серы (V_S) и горение топлива в зажигательном горне ($V_{горн.}$). Кроме того, в обычных условиях агломерации железорудных материалов имеется избыточный воздух ($V_{изб}$), который переходит в агломерационный газ, не участвуя в перечисленных химических процессах. Таким образом, можно записать:

$$V_g = V_C^{зop} + V_{изб} + V_{FeO} + V_S + V_{горн.} \quad (3)$$

Расход воздуха на окисление топлива в зажигательном горне, монооксида железа и серы шихты может быть найден по стехиометрическим соотношениям их химического взаимодействия с кислородом.

Выражение для расчета расхода воздуха на горение углерода шихты с учетом химической неполноты его горения и избытка воздуха имеет вид:

$$V_C = V_C^{zop} + V_{изб} = B_C \frac{37,5 + (\beta - 0,375)O_2''}{0,375(21 - O_2'')\rho_{O_2}\beta}, \text{ м}^3/\text{м}_\text{ш}^3, \quad (4)$$

При статистической обработке данных промышленных исследований установлено, что средняя величина стехиометрического фактора (O_2'') при агломерации различных по составу шихт равна $0,426 \pm 0,008$, а зависимость между содержанием кислорода в продуктах сгорания и концентрацией горючего углерода в слое в диапазоне ее изменения от 40 до 70 $\text{кг}/\text{м}^3$ удовлетворительно описывается уравнением

$$O_2'' = 21 - \frac{1}{2,647/B_C + 0,0235}. \quad (5)$$

Выражение для расчета расхода воздуха на горение углерода шихты (4) принимает вид:

$$V_C = 448,2 + 3,76B_C. \quad (6)$$

По величине удельного расхода воздуха определяется скорость фильтрации через слой в основном периоде агломерации (после горна):

$$w = 0,167 \cdot 10^{-4} V_\epsilon U, \quad (7)$$

где $U = H \frac{u_\text{л}}{\ell_\text{м}}$. Коэффициент гидравлического сопротивления слоя A , необходимый для расчета величины дросселирования первой вакуум-камеры, определяется из выражения:

$$A = \frac{\Delta P_{\text{сл}}}{Hw^{1,59}}. \quad (8)$$

При этом принимается, что сопротивление $\Delta P_{\text{сл}}$ составляет примерно 95 % величины разрежения в вакуум-камерах ($\Delta P_{\text{вк}}$).

В периоде горения твердого топлива в слой поступает кислорода меньше, чем в основном периоде спекания, что приводит к снижению количества выгоревшего углерода шихты и возможному рассогласованию фронтов горения и теплопередачи с уменьшением температуры в слое. Выполненный нами анализ результатов промышленных исследований показал, что состав отходящего из слоя газа, а, соответственно, и количество выгоревшего углерода, зависит от вида газообразного топлива и состава кислорода в продуктах его сгорания.

Общее количество горючего углерода, перешедшего в газ, определили по его доле и расходу в шихте без возврата, отнесенного к объему просасываемого через слой газа. Количество углерода выгоревшего в слое под горном, рассчитывали как разность содержания углерода в фильтруемых газах на входе и выходе из слоя, с учетом содержания карбонатного углерода в шихте.

Результаты определения количества выгоревшего углерода приведены в таблицах 1 и 2, из которых видно, что увеличение содержания кислорода в продуктах сгорания приводит к росту относительного количества горючего углерода под горном. Этот рост заканчивается при содержании кислорода в продуктах сгорания, равном 16...17%. Экспериментальные данные позволили получить за-

висимость содержания выгоревшего углерода в слое под горном (C) в отходящем из слоя газе от содержания кислорода (O_2) в горновых газах (Рисунок 3)

$$C = 11,77O_2 - 0,352O_2^2, \% \quad (R^2 = 0,8495). \quad (9)$$

Таким образом, скорость фильтрации газа через слой в периоде горения твердого топлива под горном ($w_{зж}$), при которой не происходит рассогласование между фронтом теплопередачи и фронтом горения, может быть определена из выражения

$$w_{зж} = 0,01(11,77O_2 - 0,352O_2^2)w. \quad (10)$$

По скорости фильтрации ($w_{зж}$) и коэффициенту гидравлического сопротивления слоя (A) определяется сопротивление слоя в режиме зажигания ($\Delta P_{зж}$). Величина дросселирования вакуум-камер в режиме зажигания определяется как разность:

$$\Delta P_{др} = \Delta P_{вк} - \Delta P_{зж}. \quad (11)$$

Таблица 1 – Результаты по определению количества выгоревшего углерода

Наименование предприятия	ОХМК			Кач ГОК	БРУ	им.А.К. Серова
№ исследования	1	2	3	4	5	6
Площадь спекания агломашин, м ²	75,0	84,0	84,0	219,0	78,1	50,0
Длина агломашин, м	30	30	30	54,75	31,25	25
Длина горна, м	4,25	4,25	4,25	15,5	4,75	5,0
Вид топлива горна	П-Д	П-Д	П-Д	П	П	П
Теплота сгорания, МДж/м ³	10,6	12,6	13,4	33,4	33,4	33,4
Содержание в продуктах сгорания топлива горна, %	CO_{2ex}	10,91	9,87	9,51	6,32	6,32
	O_{2ex}	7,89	8,32	8,47	9,80	9,80
Скорость фильтрации через слой, м/с		0,309	0,282	0,297	0,236	0,347
Общее количество углерода, перешедшее в газ,	$кг/ч$	5508,4	5521,2	5174,0	10602	7623,7
	$кг/м^3$	0,0660	0,0647	0,0576	0,0606	0,0814
Количество углерода, перешедшее в газ под горном,	$кг/м^3$	0,0542	0,0517	0,0462	0,0505	0,0698
	%	82,1	79,9	80,2	83,3	85,7
Наименование предприятия	КомМЗ	Тула-чермет	ВГОК	ММК	КарМК	
№ исследования	7	8	9	10	11	12
Площадь спекания агломашин, м ²	89,6	82,2	75,0	62,5	75	75
Длина агломашин, м	32	30	25	25	30	30
Длина горна, м	6,0	4,0	5,0	5,0	4,0	6,0
Вид топлива горна*	К-Д	П-Д	П	К	К-Д	К
Теплота сгорания, МДж/м ³	10,2	9,4	33,4	17,0	5,6	17,0
Содержание в продуктах сгорания топлива горна, %	CO_{2ex}	8,57	11,77	6,32	4,94	15,63
	O_{2ex}	9,19	7,53	9,80	10,79	6,07
Скорость фильтрации через слой, м/с		0,253	0,340	0,216	0,336	0,399
Общее количество углерода, перешедшее в газ,	$кг/ч$	5688,8	7213,4	4339,4	4611,8	5443,4
	$кг/м^3$	0,0744	0,0717	0,0744	0,0610	0,0583
Количество углерода, перешедшее в газ под горном,	$кг/м^3$	0,0577	0,0433	0,0613	0,0507	0,0272
	%	77,6	60,4	82,4	83,1	46,7

*П – природный газ, К – коксовый газ, Д – доменный газ, К-Д – коксодоменная смесь, П-Д – природно-доменная смесь.

Таблица 2 – Результаты по определению количества выгоревшего углерода в обычном режиме и при подаче кислорода

Вид топлива горна		Коксовый газ							
Теплота сгорания, МДж/м ³		17,3							
Режим		Обычный				С подачей кислорода			
Скорость фильтрации через слой, м/с		0,210				0,208			
Секции горна		весь горн	I	II	III	весь горн	I	II	III
№ исследования		13	14	15	16	17	18	19	20
Длина, м		17,4	8,4	6	3	17,4	8,4	6	3
Содержание в продуктах сгорания топлива горна, %	CO ₂ _{вх}	4,0	4,4	3,4	4,2	4,98	5,7	3,6	5,7
	O ₂ _{вх}	12,8	11,6	13,3	15,6	15,5	14,3	16,4	17,4
Общее количество углерода, перешедшее в газ,	кг/ч	17442				17498			
	кг/м ³	0,0739				0,0749			
Количество углерода, перешедшее в газ под горном,	кг/м ³	0,0669	0,0641	0,0674	0,0733	0,0726	0,0707	0,0740	0,0751
	%	90,5	86,7	91,2	99,2	96,9	94,4	98,8	100,3

В отличие от основного периода спекания исходная шихта обладает существенно большей газопроницаемостью. По данным Ю.А. Фролова коэффициент гидравлического сопротивления на исходной шихте ($\zeta_{исх}$) в 1,7 – 1,8 раза меньше коэффициента гидравлического сопротивления в режиме спекания (A). При этом сопротивление слоя исходной шихты определяется из выражения

$$\Delta P_{исх} = \zeta_{исх} H w_{жс}^{1,59}, \quad (12)$$

а величина дросселирования первой вакуум-камеры равна

$$\Delta P_{др1} = \Delta P_{вк} - \Delta P_{исх}. \quad (13)$$



Рисунок 3 – Зависимость относительного количества выгоревшего в слое под горном углерода от содержания O_2 в продуктах сгорания

Дросселирование первой вакуум-камеры и плавный нагрев исходной шихты предотвращают усадку слоя и положительно влияют на газопроницаемость шихты в основном периоде спекания.

Дросселирование целесообразно осуществлять в две ступени. В нижней части патрубка вакуум-камеры устанавливается стационарное сужающее устройство, рассчитанное на величину минимально необходимого снижения разрежения, в верхней части патрубка — мотыльковый шибер для поддержания разрежения в вакуум-камере в автоматическом режиме.

Для оптимального зажигания слоя агломерационной шихты под горном необходимо использовать топливо, обеспечивающее заданную температуру горения и максимальное содержание свободного кислорода в продуктах сгорания. Этого можно достичь, используя высококалорийное топливо, например, природный или коксовый газ, а также обогащением кислородом воздуха горения. Однако, применение технологического кислорода для обогащения воздуха не является оправданным ввиду его высокой стоимости. Повышение концентрации кислорода в горновых газах можно обеспечить подогревом воздуха, идущего на горение в горне, за счет повышения коэффициента расхода воздуха α при фиксированной температуре продуктов сгорания.

Проведенный расчет показал что, при использовании нагретого до 300 °С воздуха в горелках горна прирост производительности агломашины составляет 1,55...2,93 % (Таблица 3). Максимальный экономический эффект от подогрева воздуха будет на агломашинах оборудованных удлиненными горнами и горнами, работающие на низкокалорийном топливе.

Таблица 3 – Производительность агломашины без использования подогретого воздуха и с подогревом до 300 °С

Наименование предприятия	ОХМК			Кач ГОК	БРУ	Завод им. А.К. Серова	Ком МЗ	«Тула-гермет»	ВГОК	ММК	КарМК	
Номер исследования	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Длина горна, м	4,25	4,25	4,25	15,5	4,75	5	6	4	5	5	4	6
Длина горна к длине агломашины, %	14	14	14	28	15	20	19	13	20	20	13	20
Теплота сгорания газа, МДж/м ³	10,6	12,6	13,4	33,4	33,4	33,4	10,2	9,4	33,4	17,0	5,6	17,0
Выгорание углерода в шихте под горном, %	70,2	73,1	74,1	81,9	81,9	81,9	78,5	67,7	81,9	86,7	56,2	86,7
тоже, с подогревом, %	85,1	87,0	87,6	92,2	92,2	92,2	89,9	83,4	92,2	94,4	74,6	94,4
Потери производительности а/м от горна, %	4,2	3,8	3,7	5,1	2,8	3,6	4,0	4,3	3,6	2,7	5,8	2,7
тоже с подогревом, %	2,1	1,8	1,8	2,2	1,2	1,6	1,9	2,2	1,6	1,1	3,4	1,1
Прирост производительности при подогреве, %	2,1	2,0	1,9	2,9	1,6	2,0	2,1	2,1	2,1	1,6	2,5	1,6

Обработка данных экспериментальных исследований показала, что количество кислорода в продуктах сгорания, ограниченное необходимостью поддержания высокой температуры в горне, лимитирует скорость горения твердого топлива в слое под горном, и, как следствие, производительность агломашины. Поэтому удлинение отапливаемой части горна больше длины, необходимой для зажигания топлива верхнего слоя шихты, при низком содержании кислорода в продуктах сгорания приводит к снижению производительности агломашины.

Количество углерода твердого топлива, перешедшего в газ из слоя под горном, в зависимости от содержания кислорода в продуктах сгорания может быть определено по уравнению (9).

Данная методика позволяет определить продолжительность зажигания шихты с учетом характеристик шихтовых материалов и вида газообразного топлива, сжигаемого в горне.

В **третьей главе** представлены результаты разработки и производственных испытаний зажигательного горна новой конструкции.

С учетом того, что режим комбинированного нагрева шихты при использовании относительно дешевых (для России) газообразных видов топлива, включая и природный газ, обеспечивает наиболее благоприятные экономические показатели, за основу был принят именно такой режим зажигания и соответствующий тип горна.

На основании опыта промышленных исследований тепловой работы агломерационных машин и технологических особенностей агломерации, обобщены и уточнены требования к температурным и газодинамическим режимам эксплуатации устройств для внешнего нагрева слоя. Из них можно выделить основные теплотехнические и эксплуатационные требования к конструкции горнов: обеспечение равномерного по ширине и регулируемого по длине температурного поля над слоем; высокий тепловой к.п.д.; простота конструкции и удобство эксплуатации. С технологической и экономической точек зрения устройство должно обеспечивать наилучшие показатели качества агломерата, энергоэффективности и производительности.

Характер распределения температурного поля по длине горна должен обеспечивать оптимальные условия для слоя агломерационной шихты в периодах предварительного нагрева шихты, зажигания и формирования активной зоны горения твердого топлива, дополнительного нагрева слоя.

При спекании шихт, чувствительных к конденсации влаги, температура теплоносителя над слоем в период подогрева шихты (1,0...1,5 мин) должна изменяться по длине горна от 300...500 °С до максимальной. Для подогретых и малочувствительных к конденсации влаги шихт допустим более жесткий режим нагрева слоя под горном. Тепловой режим для той части горна, где осуществляется зажигание слоя, выбирают исходя из условий достижения максимальной скорости формирования зоны горения в слое. Указанному условию соответствует определенное изменение по длине горна соотношение между температурой горновых газов и содержанием в них кислорода. Это соотношение поддерживается путем соблюдения в горновом пространстве закономерностей распределения температур в средней части слоя, где формируется агломерат требуемого качества. Тепловой режим при этом следует устанавливать с учетом изменения содержания CO_2 и O_2 в газах над слоем и на выходе из него. В той части горна, где происходит дополнительный прогрев слоя, температура теплоносителя должна снижаться по мере увеличения уровня регенерации тепла (по ходу движения спекательных тележек). Эти условия должны учитываться при формировании температурного и газодинамического режимов работы горна.

Основными требованиями к горелочным устройствам и системе отопления горна, реализация которых обеспечивает необходимый режим зажигания слоя и его последующий прогрев, являются:

- полное сжигание газа до входа в слой;
- равномерное распределение температур и состава газа по ширине горна;
- поддержание необходимого графика изменения температур за счет избыточного содержания кислорода по длине горна;
- минимальное разрежение в нижней части боковых стен горна для исключения подсосов холодного воздуха у бортов тележек;
- устойчивость работы горелок в пределах регулирования тепловой нагрузки должна быть не менее 1:4 при сжигании газа с коэффициентом расхода воздуха до $\alpha = 2,5 \dots 3,0$;
- работоспособность при малых гидравлических сопротивлениях;
- обеспечение других общих требований по технике безопасности и экологии.

Необходимый температурный режим по длине горна может быть реализован двумя способами. Первый способ заключается в секционном регулировании температуры с подачей топлива и воздуха по отдельным секциям. Второй способ связан с соблюдением определенного распределения температур по длине горна путем установки горелок либо разной производительности, но с одинаковым шагом по длине, либо одинаковой производительности, но с переменным шагом по длине или же за счет использования одинаковых корпусов горелок с равномерным шагом по длине, но с различными проходными сечениями газовых наконечников сопел.

Исходя из вышеизложенного, наиболее рациональным является малогабаритный горн конструкции «ВНИИМТ», предназначенный для зажигания шихты при реализации комбинированного нагрева (Рисунок 4).

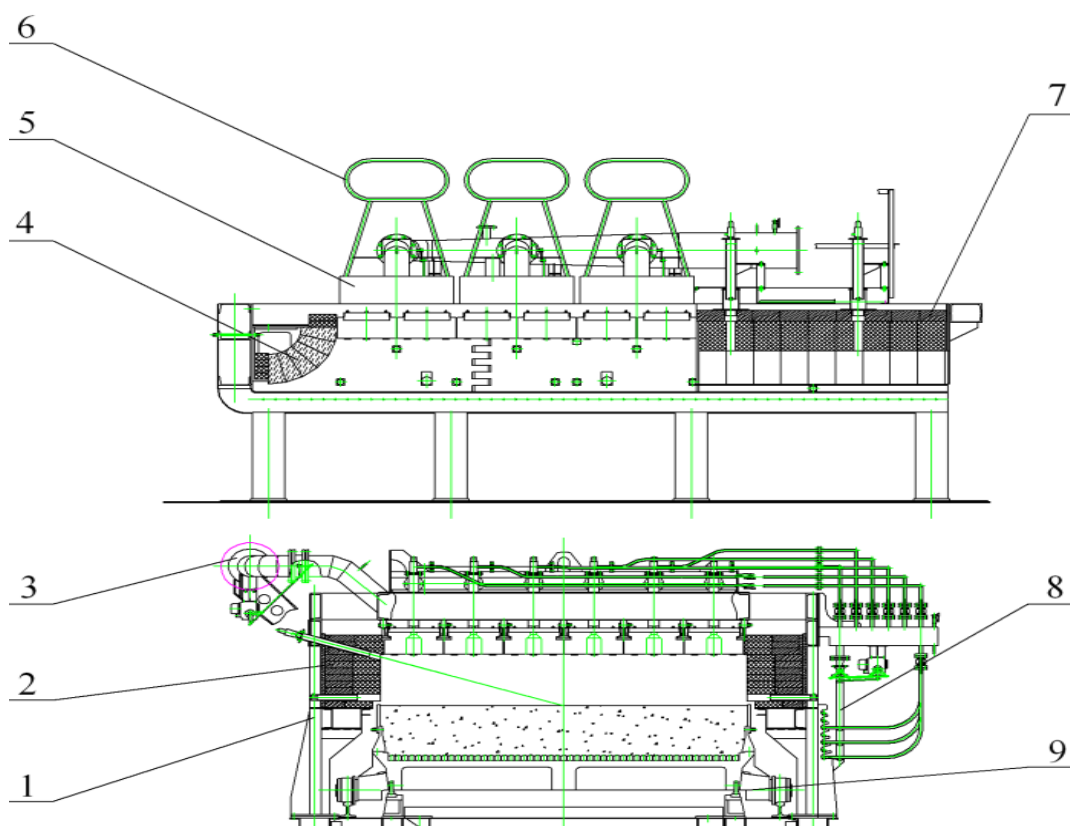


Рисунок 4 – Горн для зажигания шихты. 1 – корпус; 2 – футеровка боковых стен; 3 – воздухопровод; 4 – передняя стенка; 5 – съемная панель; 6 – съемные площадки обслуживания; 7 – козырек; 8 – газопровод; 9 – спекательная тележка с шихтой

К особенностям горна относятся малый объем топочного пространства, отсутствие водяных холодильников, воздушная защита бортов и роликов спекательных тележек и конструкция горелочных панелей, позволяющая утилизировать тепловые потери свода с воздухом, подаваемым в горелки.

Конструкция горна характеризуется малыми потерями тепла в окружающее пространство, обусловленные низкой высотой свода горна, позволяющей уменьшить размеры боковых стен, а также конструкцией панели, охлаждаемой воздухом, подаваемым в горелки горна. Плавное изменение температуры в горне обеспечивается применением в его конструкции арки и козырька, технические параметры которых возможно изменять в зависимости от условий зажигания шихты. Равномерный нагрев по ширине горна достигается расположением на своде с небольшим шагом мало мощных короткофакельных горелок, разработанных специально для горнов агломерационных машин (Рисунок 5).

Горелки отвечают современным требованиям, имеют систему розжига и контроля пламени. Вредные выбросы не превышают допустимых норм.

Горелки короткофакельные, определенной тепловой мощности. Их количество, а также расстояние от среза горелочного тоннеля до шихты выбирается из условий обеспечения равномерного температурного поля по ширине тележки и снижения потерь тепла через боковые стенки горна. С учетом сказанного расстояние от поверхности шихты до горелочных тоннелей составляет 500 – 600 мм.

Первый малогабаритный горн нового образца с двумя горелочными панелями длиной 2 м был установлен на агломашине МАК-75 ОАО "Мечел". При высоте слоя шихты 240 – 260 мм и скорости движения спекательных тележек 2,0 – 2,1 м/мин времени пребывания шихты в зоне высоких температур оказалось недостаточно, и в период очередного ремонта была установлена дополнительная, третья панель с горелками. При этом удельный расход тепла на зажигание составил 130 – 140 МДж/т агломерата. В дальнейшем горны агломашии МАК-75 ОАО "Мечел" и ОАО "Высокогорский ГОК" оснащались тремя панелями.

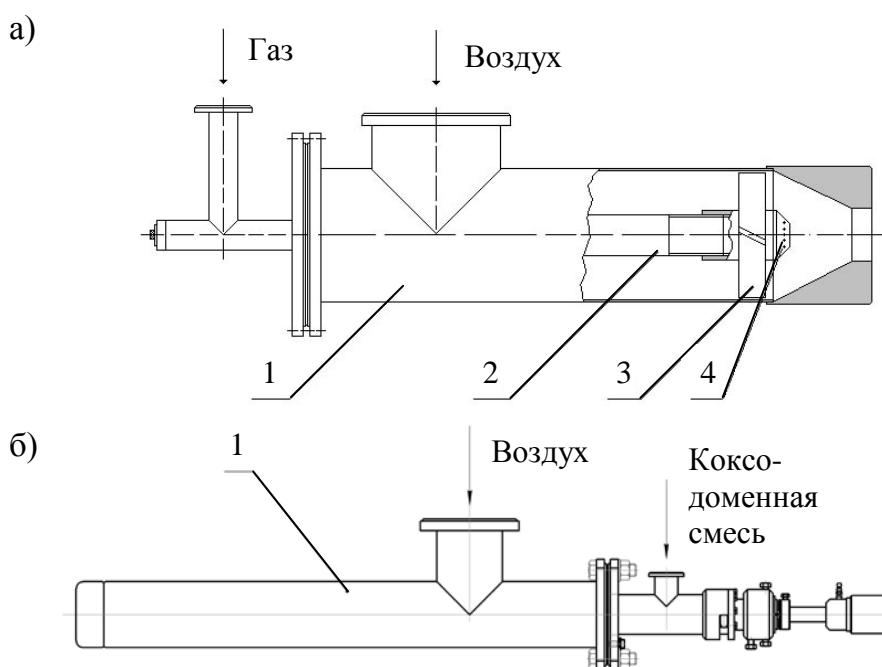


Рисунок 5 – Горелки для работы на природном газе ГНП-3ММ (а) и на коксо-доменной смеси ГКДС (б).

1 – корпус; 2 – газовая труба; 3 – завихритель; 4 – газовое сопло

При проведении испытаний на агломашине № 3 ВГОКа выполнили измерения температур поверхности шихты в горне. Агломашина производила офлюсованный агломерат, температура шихты составляла $38\text{ }^{\circ}\text{C}$, высота слоя — 240 мм, плотность шихты — 1970 кг/м^3 , содержание возврата — 27,3 %, влага — 8,1 %, выход годного — $0,592\text{ кг агломерата/кг влажной шихты}$, скорость движения спекательных тележек — $1,8\text{ м/мин}$. В патрубках двух первых вакуум-камер агломашины установлены плиты для дросселирования со стационарными отверстиями разного сечения.

По результатам определений доля фракции $> 3\text{ мм}$ в топливе (коксовой мелочи) с весодозаторов составляла 5,9 %, фракции $< 0,5\text{ мм}$ — 39,2 %, среднелогарифмический диаметр топлива — 0,80 мм. Среднелогарифмический диаметр частиц шихты после окомкователя — 2,62 мм, содержание углерода — 4,18 %. Характеристики шихты и спека по пробам, отобраным со спекательных тележек, приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Характеристики шихты и спека по пробам, отобраным со спекательных тележек

Расстояние от верха слоя, мм	Шихта			Спек		
	плотность, кг/м ³	диаметр частиц, мм	C, %	FeO, %	прочность по ГОСТ 15137–77, %	
					$> 5\text{ мм}$	$< 0,5\text{ мм}$
0 – 80	1790	2,04	4,37	15,1	60,6	5,8
80 – 160	1940	2,25	4,48	15,1	58,5	6,0
160 – 240	2100	3,48	3,69	12,4	66,1	7,3

Горн работал с автоматическим управлением тепловым режимом. По термопаре, установленной в боковой стенке под второй панелью на расстоянии 20 мм выше кромки борта спекательных тележек, регулировался расход газа (заданная температура в горне — $1170\text{ }^{\circ}\text{C}$). Средний расход газа на отопление горна составил $430\text{ м}^3/\text{ч}$, расход воздуха был установлен с коэффициентом $\alpha = 1,44$. Температуру поверхности шихты измеряли пирометром через боковые стенки горна и со стороны козырька.

Результаты измерений в горне сводятся к следующему. При скорости фильтрации, рассчитанной как объем продуктов сгорания, отнесенный к площади отапливаемой части горна [$w_{зж} = 0,204\text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$], воспламенение твердого топлива на поверхности шихты происходило на расстоянии 400 – 500 мм от начала арки при ее протяженности по горизонтали 700 мм. Температура поверхности шихты в центре горна под второй панелью, под третьей, в начале козырька и на выходе из-под него составляла, соответственно, 1260, 1170, 1130 и $670\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для частиц шихты и топлива со среднелогарифмическим диаметром, соответственно, 2,04 и 0,80 мм расчетная продолжительность нагрева от $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ до температуры воспламенения ($\sim 700\text{ }^{\circ}\text{C}$), горения топлива на поверхности слоя, дополнительного нагрева и охлаждения поверхности спека до $670\text{ }^{\circ}\text{C}$ составила 0,2 – 0,3, 1,4 – 1,5, 1,3 – 1,4 мин соответственно. Для полного выгорания твердого топлива по всей высоте слоя средняя скорость перемещения зоны горения долж-

на быть не менее $19,6 \text{ мм/мин}$. При этом высота зоны горения на момент $\tau_{\text{зж}} = 1,7 \text{ мин}$ составит $27 - 29 \text{ мм}$.

Процесс зажигания шихты характеризовался удельным расходом тепла на зажигание $q_{\text{зж}} = 160 \text{ МДж/т}$ агломерата. Прочность и истираемость спека из верхней части слоя были выше, чем из середины (Таблица 4). В связи с этим представляется возможным уменьшить расход тепла на зажигание за счет сокращения продолжительности дополнительного нагрева в отапливаемой части горна и реализации режима "нулевого давления" в рабочем пространстве горна на уровне бортов тележек с использованием АСУ.

Горн для зажигания шихты с $q_{\text{зж}} = 105 \text{ МДж/т}$ агломерата в слое высотой 500 мм с автоматическим управлением тепловым и газодинамическим режимами был поставлен в составе агломашины МАК-75 на металлургический комбинат "Запорожсталь".

Для агломашины МАК-408, изготовленной для Визакханатнамского металлургического завода в Индии, проектный расход тепла на зажигание за счет сжигания газа составляет $62,8 \text{ МДж/т}$ агломерата. Кроме того, в горелки горна и в укрытие за ним протяженностью 37 м предусмотрена подача воздуха с температурой $275 \text{ }^{\circ}\text{C}$ с охладителя агломерата. Дополнительный приход тепла с воздухом в верхнюю часть слоя составит $167,4 \text{ МДж/т}$ агломерата, т.е. на зажигание и дополнительный подогрев шихты подается $230,2 \text{ МДж/т}$ агломерата, причем на 73 \% — это утилизированное (возвращенное в процесс агломерации) тепло.

Таким образом, разработанная новая базовая конструкция горна с горелочными устройствами для зажигания агломерационной шихты реализует комбинированный нагрев шихты при сжигании различных видов газообразного топлива, в т.ч. и с подогретым воздухом. Вредные выбросы не превышают допустимых норм.

В четвертой главе сформулированы принципы управления тепловым режимом зажигательного горна агломашин. Основной задачей системы автоматического управления является стабилизация тепловой обработки верхней части слоя аглошихты и повышение качества агломерата, а также обеспечение устойчивой работы горна при заданном удельном расходе газообразного топлива.

Сложность создания системы управления тепловой работой зажигательного горна возникает в связи с протеканием процесса в условиях входных возмущающих воздействий, вызванных изменениями содержания при дозировке в шихте топлива, флюсов, возврата, колебаниями влажности и как следствие, гранулометрического состава шихты, которые сводятся к изменению энтальпии и газопроницаемости шихты. Соответственно, задачами системы автоматического управления является поддержание в горне необходимых температурного и газодинамического режимов зажигания, которые реализуется следующим образом.

1. Для обеспечения скорости фильтрации продуктов сгорания по длине горна, при необходимом нагреве исходной шихты и обусловленной концентрацией кислорода в продуктах сгорания при образовании зоны горения, по методике, представленной во второй главе, производится расчет стационарных диафрагм, устанавливаемых в патрубках вакуум-камер под горном для обеспечения необходимого гидравлического сопротивления тракта.

2. Расход воздуха устанавливается на уровне, обеспечивающем нулевое давление в рабочем пространстве горна при заданной температуре зажигания.
3. Устанавливается заданная температура рабочей поверхности шихты, которая затем поддерживается изменением расхода газа.

Автоматика предусматривает управление работой горна в основном режиме, а также при кратковременных остановках агломашины.

Уравнение управления тепловым режимом вытекает из уравнения теплового баланса (1), правую часть которого можно записать в виде:

$$Q = c_{np} t_{np} V_z [V_{np}^0 + V_{\epsilon}^0 (\alpha - 1)] , \text{ кДж/ч} . \quad (14)$$

Тогда, уравнение (1) имеет вид:

$$60 q_{зж} k_{ш} \rho_{ш} H b u_{л} = c_{np} t_{np} V_z [V_{np}^0 + V_{\epsilon}^0 (\alpha - 1)] . \quad (15)$$

Поскольку температура в горне $t_{горн}$ пропорциональна температуре продуктов сгорания t_{np} с учетом пирометрического коэффициента ϵ , $t_{горн} = \epsilon t_{np}$, то поддерживаемая температура в горне $t_{горн}$, обеспечивающая зажигание шихты, будет описываться следующим уравнением:

$$t_{горн} = \frac{60 q_{зж} k_{ш} \rho_{ш} H b u_{л}}{c_{np} \epsilon V_z [V_{np}^0 + V_{\epsilon}^0 (\alpha - 1)]} . \quad (16)$$

Выражение в знаменателе можно представить в виде:

$$V_{np}^0 + V_{возд}^0 (\alpha - 1) = V_{np}^0 - V_{\epsilon}^0 + \alpha V_{\epsilon}^0 . \quad (17)$$

Для шихты конкретного состава и высоты загружаемого слоя введем коэффициент a , равный

$$a = 60 \frac{k_{ш} \rho_{ш} H b}{\epsilon c_{np}} . \quad (18)$$

Для газа (смеси газов) данного состава введем коэффициент ϵ , равный

$$\epsilon = V_{np}^0 - V_{возд}^0 . \quad (19)$$

Таким образом, уравнение (16) можно записать в виде:

$$t_{горн} = \frac{a q_{зж} u_{л}}{V_z (\epsilon + \alpha V_{возд}^0)} . \quad (20)$$

При заданном удельном расходе тепла на зажигание (q) регулирование сводится к поддержанию необходимой температуры в горне ($t_{горн}$) путем изменения расхода газа и/или воздуха. При увеличении скорости ленты ($u_{л}$), что может быть связано с увеличением газопроницаемости шихты, увеличивают расход газа и воздуха, не изменяя их соотношение. При $u_{л} = const$ и уменьшении температуры в горне ($t_{горн}$) расход газа оставляют прежним, а уменьшают соотношение воздух – газ. При этом образующееся разрежение в горне за счет уменьшения расхода воздуха компенсируется прикрытием шиберов в патрубках вакуум-камер под горном. Регулирование давления в горне в основном режиме обеспечивается изменением тепловой мощности.

При кратковременных остановках агломашины (скорость движения спекательных тележек равна нулю) регулятор расхода воздуха переходит в режим ре-

гулирования соотношения «топливо-воздух», автоматика закрывает регулирующий воздушный дроссель, обеспечивая расход воздуха с коэффициентом $\alpha = 1$. После чего закрывается газовый дроссель, выдерживая величину соотношения с коэффициентом $\alpha = 1,2$. Таким образом, в четыре шага обеспечивается сокращение расхода газа до 50% от основного режима. Регулирование давления-разрежения под горном осуществляется с помощью дроссельных клапанов, установленных в патрубках вакуум-камер.

При включении привода агломашины происходит возврат к исходным значениям расходов газа и воздуха в обратном порядке.

Предлагаемая система управления тепловым и газодинамическим режимами горна содержит:

- контур регулирования температуры под горном;
- контуры регулирования давления-разрежения под горном;
- контур регулирования соотношения топливо-воздух;
- автоматика безопасности панелей и горна.

Управление тепловым режимом горна может осуществляться в автоматическом и ручном режимах.

Разработанный алгоритм системы управления температурным и газодинамическим режимами работы зажигательного горна, учитывающий основные технологические параметры, обеспечивающие оптимальный температурный режим поверхности шихты под горном:

- расходы газа и воздуха на отопление горна;
- скорость движения спекательных тележек;
- скорость фильтрации газов через слой;
- температуру дополнительного подогрева воздуха, подаваемого в горелки и в слой за горном.

На основании изложенных принципов управления разработан алгоритм управления зажигательным горном на агломашине № 1 Высокогорского ГОКа. В период промышленных испытаний на агломашине осуществлялось производство агломерата из железорудной шихты следующего состава: концентрат – 68,7, руда – 10,3, отходы – 7,7, флюс – 9,2 и твердое топливо – 4,1 %. Высота слоя шихты, загружаемой на спекательные тележки, составляло 200...230 мм, разрежение и температура газа в сборном коллекторе агломашины – 7,5...8,5 кПа и 110...130 °С. Для зажигания шихты использовался природный газ Тюменского месторождения с низшей теплотой сгорания 33,5 МДж/м³.

Параметры работы горна с автоматическим управлением приведены для 5 различных режимов (Таблица 5): 3 – «рабочий режим»; 1 – увеличенная (2,0...2,2 м/мин) скорость движения спекательных тележек; 2 – остановка агломашины («малый газ»); 4 – уменьшенный расход газа на панель; 5 – уменьшенным расход газа на панели 2 и 3.

В режиме 1 заданное значение температуры в рабочем пространстве горна было выше, чем в рабочем режиме, и расход газа имел повышенное значение.

В режиме 2 заданное значение температуры имело минимальное значение, расход газа в 2 раза ниже, чем в рабочем режиме, однако высокие температуры в рабочем пространстве горна поддерживаются некоторое время за счет горения твердого топлива на поверхности шихты. Дальнейшее снижение расходов газа и

воздуха ограничено диапазоном регулирования клапанов на трубопроводах газо- и воздухопоснабжения горна. Высокие температуры в рабочем пространстве горна и низкий расход воздуха на горелки влекут за собой увеличение температуры металлического основания панелей.

Таблица 5 – Параметры работы зажигательного горна агломашины 1 Высокогорского ГОКа в автоматическом режиме

Наименование параметра		Режим				
		1	2	3	4	5
Скорость движения спекательных тележек, м/мин		2,65	0,0	2,00	2,20	2,00
Расход на горн, $\text{м}^3/\text{ч}$	природного газа	520	240	470	475	460
	воздуха на горелки	6500	3200	5900	6000	5800
Коэффициент расхода воздуха		1,29	1,38	1,30	1,30	1,30
Соотношение расходов «газ – воздух»		12,5	13,3	12,5	12,6	12,6
Температура в рабочем пространстве горна, $^{\circ}\text{C}$	над бортом тележки	1080	1160	1000	1030	990
	поверхности шихты	1210	1260	1200	1190	1170
	под сводом панели № 2	1200	1300	1180	1190	1130
	под сводом панели № 3	1190	1340	1180	1170	1160
	футеровки стен	1100	1200	1090	1030	1020
Состав продуктов сгорания, %	CO_2	9,0	8,6	9,2	8,8	9,0
	O_2	5,0	6,2	5,0	5,2	5,2
	CO	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Расход газа на панель, $\text{м}^3/\text{ч}$	панель № 1	180	82	160	195	190
	панель № 2	170	79	155	155	135
	панель № 3	170	79	155	125	135
Расход воздуха на панель, $\text{м}^3/\text{ч}$	панель № 1	2190	1230	1990	2030	1960
	панель № 2	2170	1155	1960	2010	1930
	панель № 3	2140	815	1950	1960	1910
Температура металлического основания панели, $^{\circ}\text{C}$:	панель № 1	90	140	80	75	85
	панель № 2	150	275	120	135	155
	панель № 3	130	320	110	115	115
Температура, $^{\circ}\text{C}$:	природного газа после ГРУ	3	2	0	0	2
	воздуха после вентилятора	13	11	11	10	12
	в вакуум-камерах под горном	85	90	75	80	85
	наружных стен горна	53	56	49	51	55
Приход тепла, МДж/ч :		17313	8035	15728	15888	15400
Потери тепла, МДж/ч :	с уходящими газами	670	403	622	674	733
	через наружную стенку	36	42	28	33	39
Коэффициент использования тепла, %		95,9	94,5	95,9	95,6	95,0

Включение контуров регулирования расхода газа на панель 3 (режим 4) и на панели 2 и 3 (режим 5) не привело к снижению расхода газа на горн в целом, и температуры под сводом панелей практически не изменились. В связи с этим в дальнейшем контур автоматического регулирования положением ЗМС был переведен в режим «ручное управление», ЗМС – в положение «открыто».

Из таблицы 5 видно, что практически все тепло, вносимое газом и воздухом в рабочее пространство горна, усваивается шихтой. Горелки обеспечивают сжигание природного газа при отсутствии химического недожога. Потери тепла

через наружную поверхность горна составляют в рабочем режиме 0,2...0,3 % и увеличиваются до 0,5 % при кратковременной остановке агломашины. Коэффициент использования тепла в горне находится на уровне 95 %, его дальнейшее увеличение ограничено технологическими особенностями процесса агломерации. По данным испытаний были определены значения органов настройки регуляторов и внесены в управляющие программы вычислительной техники.

В настоящее время малогабаритные зажигательные горны, оборудованные системой автоматики, работают на 2-х агломашинах МАК-75 аглофабрики № 1 ОАО «Челябинский меткомбинат» и 3-х агломашинах ОАО «Высокогорский ГОК», на 2-х агломашинах МАК-138/240 аглофабрики № 2 ОАО «Челябинский меткомбинат». Снижение расхода природного газа на зажигание шихты при внедрении горнов составило $4...5 \text{ м}^3/\text{т}$ агломерата.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРАТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. На основании данных промышленных исследований различных агломашин установлено, что в режиме образования и поддержания зоны горения твердого топлива имеет место низкая концентрация кислорода в продуктах сгорания, обусловленная необходимостью обеспечения высокой температуры в горне. Дефицит кислорода ограничивает скорость горения твердого топлива в слое под горном, что выражается в снижении количества выгоревшего углерода в шихте.

2. Определена, по результатам исследований, зависимость относительного количества выгоревшего в слое под горном углерода от содержания свободного кислорода в продуктах сгорания и, соответственно, от вида газообразного топлива. Полученная зависимость позволяет установить необходимый режим сжигания (α – коэффициент расхода воздуха) и, при необходимости, величину добавочного кислорода за счет атмосферного воздуха. Получено выражение для расчета скорости фильтрации продуктов сгорания через слой под горном и величины дросселирования вакуум-камер при нагреве шихты и в режиме ее зажигания.

3. Предложен алгоритм расчета скоростей фильтрации и величины дросселирования вакуум-камер под горном, учитывающий физические характеристики агломашины, удельную производительность, химический состав шихты и вид газообразного топлива.

4. Разработана методика расчета времени зажигания агломерационной шихты (для горна) в зависимости от конкретных начальных условий.

5. Разработана базовая конструкция горна для зажигания шихты, обеспечивающего энергосберегающую технологию агломерации за счет плавного изменения температуры шихты по длине горна, равномерного нагрева по ширине горна, возможности использования нагретого воздуха от охлаждения спека и рециркуляции дымовых газов.

6. Разработан алгоритм и функциональная схема управления тепловым и газодинамическим режимами работы горна, базовым параметром которого является удельный расход теплоты на зажигание. Алгоритм позволяет осуществлять управление горном при работе агломашины как в стационарном режиме, так и при ее останове, включая «ручное управление».

7. Проведены промышленные испытания горнов разработанной конструкции на агломерационных машинах различных предприятий. Во всех случаях без ухудшения качества агломерата верхнего слоя получено сокращение удельного

расхода тепла в 2...2,5 раза, что позволяет заменять распространенные ранее удлиненные горны для комбинированного нагрева шихты.

**Основное содержание диссертации опубликовано
в следующих печатных работах:**

Статьи в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК

1. Хамматов И.М. Новый горн для зажигания агломерационной шихты и система управления тепловым режимом / Л.К. Герасимов, Г.М. Дружинин, И.М. Хамматов и др. // Сталь. 2005. № 3. С. 13–15 (0,2 п.л. / 0,1 п.л.).

2. Хамматов И.М. Опыт разработки и освоения зажигательных горнов агломерационных машин / Л.К. Герасимов, Г.М. Дружинин, И.М. Хамматов и др. // Сталь. 2010. № 3. С. 23–27 (0,3 п.л. / 0,15 п.л.).

3. Хамматов И.М. Некоторые пути повышения теплотехнических и экологических показателей работы агломерационных машин / Л.К. Герасимов, Г.Г. Добряков, И.М. Хамматов и др. // Сталь. 2010. № 3. С. 110–113 (0,3 п.л. / 0,2 п.л.).

Патенты

4. Пат. 24432538 С1 Рос. Федерация, МПК F27B21/08 (2006.01). Устройство для подачи теплоносителя в слой спекаемой шихты на агломерационной машине / Герасимов Леонид Константинович, Дружинин Геннадий Михайлович, Чистополов Виктор Александрович, Хамматов Ильшат Маулитович, Шепелев Юрий Иосифович, Чуб Вячеслав Владимирович; заявитель и патентообладатель ОАО «Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники» (ОАО "ВНИИМТ"). – № 2010116451/02 ; заявл. 26.04.2010 ; опубл. 27.10.11, Бюл. № 30. – 7 с.

5. Пат. 245378 С1 Рос. Федерация, МПК F27B21/08 (2006.01). Способ спекания агломерационной шихты с использованием пылесодержащего аспирационного воздуха / Герасимов Леонид Константинович, Дружинин Геннадий Михайлович, Чистополов Виктор Александрович, Хамматов Ильшат Маулитович; заявитель и патентообладатель ОАО «Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники» (ОАО "ВНИИМТ"). – № 2010142096/02 ; заявл. 13.10.2010 ; опубл. 20.06.12, Бюл. № 17. – 6 с.

Публикации в сборниках трудов научных конференций

6. Хамматов И.М. Оценка суммарной допускаемой погрешности результатов измерения температуры греющих газов в нагревательных печах / Г.М. Дружинин, И.М. Хамматов, В.И. Лобанов // Научные материалы РУО АИН РФ к общему собранию членов Академии 25 ноября 2005 г. Екатеринбург: Изд-во АМБ. 2005. Т. 1. С. 175–183 (0,4 п.л. / 0,2 п.л.).

7. Хамматов И.М. Автоматизированная система управления работой зажигательного горна агломерационной машины / Л.К. Герасимов, Г.М. Дружинин, И.М. Хамматов и др. // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве: труды VI всероссийской научно-практической конференции, г. Новокузнецк, 17-19 мая, 2007 г. Новокузнецк: СибГИУ, 2007. С. 131–133 (0,2 п.л. / 0,1 п.л.).

8. Герасимов Л.К., Дружинин Г.М., Хамматов И.М., Чистополов В.А., Спирин Н.А. Энергосберегающие и природоохранные мероприятия при производстве агломерата // Доменное производство – XXI век. Труды международного конгресса доменщиков, Москва 12–16 апреля 2010 г. – М: Издательский дом «Кодекс», 2010. – С. 143 (0,1 п.л. / 0,05 п.л.).

9. Хамматов И.М. Влияние подогрева шихты на ленте перед зажиганием на параметры работы агломерационной машины / Л.К. Герасимов, Г.М. Дружинин, И.М. Хамматов // Творческое наследие В.Е. Грум-Гржимайло: сборник докладов международной научно-практической конференции, г. Екатеринбург, 27–29 марта, 2014 г. Екатеринбург: УрФУ, 2014. – С. 102–108 (0,4 п.л. / 0,2 п.л.).

10. Хамматов И.М. Методика расчета продолжительности зажигания слоя с учетом свойств шихтовых материалов и вида газообразного топлива / И.М. Хамматов, Л.К. Герасимов // Творческое наследие В.Е. Грум-Гржимайло: сборник докладов международной научно-практической конференции, г. Екатеринбург, 27–29 марта, 2014 г. Екатеринбург: УрФУ, 2014. – С. 393–397 (0,3 п.л. / 0,15 п.л.).

Основные обозначения и символы

q – удельный расход тепла на зажигание углерода шихты, $\text{кДж}/\text{т агломерата}$; H – высота слоя шихты, м ; $u_{\text{л}}$ – скорость движения аглоленты, $\text{м}/\text{мин}$; $\rho_{\text{ш}}$ – объемная плотность шихты, $\text{т}/\text{м}^3$; $k_{\text{ш}}$ – выход годного агломерата из влажной шихты, $\text{т}/\text{т}$; c – теплоёмкость газа, $\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{град})$; t – температура по шкале Цельсия, $^{\circ}\text{C}$; w – скорость фильтрации газа, $\text{м}/\text{с}$; ℓ – длина, м ; τ – время пребывания шихты под горном, мин ; V – удельный объёмный расход газа, $\text{м}^3/\text{м}_{\text{ш}}^3$; $B_{\text{с}}$ – объёмная концентрация углерода в слое, $\text{кг}/\text{м}_{\text{ш}}^3$; β – стехиометрический фактор, $\text{кг}_{\text{углерода}}/\text{кг}_{\text{кислорода}}$; O_2'' – содержание кислорода в продуктах сгорания углерода шихты; ρ_{O_2} – плотность кислорода при нормальных условиях, $\text{кг}/\text{м}^3$; U – вертикальная скорость спекания, $\text{мм}/\text{мин}$, A – коэффициент гидравлического сопротивления слоя; P – давление газа, Па ; $\zeta_{\text{исх}}$ – коэффициент гидравлического сопротивления на исходной шихте.

Индексы:

$зж$ – относящиеся к периоду пребывания шихты под горном; $ш$ – относящиеся к шихте; $пр$ – относящиеся к продуктам сгорания; $горн$ – относящиеся к горну; $в$ – относящиеся к воздуху; $гор$ – означающий горючий; $изб$ – означающий избыточной; $м$ – относящиеся к агломашине; Δ – означающий изменение параметра; $сл$ – относящиеся к слою; $др$ – относящиеся к дросселированию; $вк$ – относящиеся к вакуум-камерам; $г$ – относящиеся к газу.

Автор выражает глубокую признательность коллективу лаборатории теплотехники агломерации, в том числе научному консультанту, кандидату технических наук, заведующему лабораторией Л.К. Герасимову, коллективу лаборатории теплотехники и систем отопления нагревательных печей ОАО «ВНИИМТ» и сотрудникам кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии» УрФУ за помощь в работе над диссертацией.

Подписано в печать 21.10.2014 г.

Бумага писчая

Уч.-изд.л. 1,0 л.

Плоская печать

Тираж 130

Формат 60x84 1/16

Усл. печ. 1,2 п.л.

Заказ 5184 Бесплатно

Отпечатано в типографии

ООО «Издательство УМЦ УПИ»

г. Екатеринбург, ул. Гагарина, 35а, оф. 2

Тел.: (343) 362-91-16, 362-91-17